

位相限定相関法に基づく人体の画像計測とその応用に関する研究

著者	宮澤 一之
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	情博第466号
URL	http://hdl.handle.net/10097/51145

氏名（本籍地）	みやざわ かずゆき 宮澤 一之
学 位 の 種 類	博 士（情報科学）
学 位 記 番 号	情 博 第 466 号
学位授与年月日	平成22年 3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科、専攻	東北大学大学院情報科学研究科（博士課程）情報基礎科学専攻
学位論文題目	位相限定相関法に基づく人体の画像計測とその応用に関する研究
論文審査委員	（主査）東北大学教授 青木 孝文 東北大学教授 篠原 歩 東北大学教授 川又 政征 (工学研究科)

論文内容の要旨

第1章 緒言

画像計測は、対象物を画像としてとらえ、その画像信号から対象物の種類、位置、寸法、変位、面積、形状、個数などの計量値を求めることを目的とする。その応用は幅広く、近年のエレクトロニクス技術の発展に伴って、FA（ファクトリーオートメーション）、バイオ、医療、セキュリティ、リモートセンシングなどの分野で導入が進んでいる。画像計測には様々な画像処理技術が必要とされるが、それらの中でも最も重要な技術の一つに、「画像マッチング」がある。

画像マッチングの目的は、画像間の類似度を評価する「画像照合」と、位置合わせを行う「画像レジストレーション」に大別することができ、古くから多くの手法が提案されてきている。それらの中でも、画像の位相情報を用いた位相限定相関法は、その高い精度とノイズに対するロバスト性から大きな注目を集めている。位相限定相関法は、画像のフーリエ変換から得られる振幅成分と位相成分のうち、位相成分のみを用いた画像マッチング手法であり、複雑・ランダムなパターンを持つ画像に対して大変高い効果を発揮する。本論文では、そのような画像の代表例として人体から取得される生体画像に着目し、人体の画像計測に位相限定相関法を応用する。本論文では、生体画像のマッチングに焦点を絞り、生体画像の「照合」と「レジストレーション」の双方の目的に対して位相限定相関法に基づく統一的な技術開発を行う。具体的には、生体画像を対象として体系化した位相限定相関法に基づく画像マッチング技術を画像照合の観点から「バイオメトリクス認証」、画像レジストレーションの観点から「人体形状計測」に応用し、従来技術の問題点を解決することでその有効性を実証する。

第2章 人体の画像計測に関する基礎的考察

本論文では、生体画像の照合の問題としてバイオメトリクス認証、特に最も高信頼な認証が可能であるとされる虹彩認証に着目し、生体画像のレジストレーションの問題として人体形状計測に着目する。以下、それぞれの応用について基礎的考察を行う。

2. 1 虹彩認証に関する基礎的考察

虹彩とは、白目の内側で瞳孔の外側にあるドーナツ状の筋肉であり、個人により異なる極めて複雑なパターンを持つため、これを解析することで高精度な個人識別が可能である。従来の虹彩認証アルゴリズムでは、画像中の虹彩領域から特徴を抽出し、その結果をコンパクトなコードに圧縮する手法が一般的であったが、虹彩パターンの情報を大きく圧縮することは認証性能の低下につながり、また、特徴抽出に用いるフィルタなどのパラメータ最適化は大変煩雑である。そこで本論文では、生体画像の照合に位相限定相関法が効果的であるとの見通しから、位相限定相関法を用いて虹彩画像を直接的にマッチングする手法を提案し、実験を通してその有効性を示す。

2. 2 人体形状計測に関する基礎的考察

人体形状計測とは、人体表面の3次元形状を定量的に取得することを指し、特に人体全身の計測は医療やコンピュータグラフィックスなど多岐に渡る分野において重要な技術である。現在までに実用化されている人体形状計測システムは、ほぼ例外なくレーザなどを用いた能動型3次元計測法を利用している。能動型計測法は、高精度な3次元計測が可能であるが、レーザなどを人体に照射することは好ましくない。一方、レーザなどを使用せずカメラだけで計測を行う受動型計測法の代表例にステレオビジョンがある。ステレオビジョンによる3次元計測では、ステレオ画像のサブピクセル精度での対応付け(局所的なレジストレーション)が要求され、その難しさにより計測精度が低下しやすい。本論文では、生体画像のレジストレーションに位相限定相関法が効果的であるとの見通しから、ステレオ対応付けに位相限定相関法を利用し、能動型計測に匹敵する精度を持つ受動型人体形状計測システムの開発を目指す。

第3章 位相限定相関法に基づく画像マッチング

本論文では、生体画像のマッチングに焦点を絞り、生体画像の「照合」と「レジストレーション」の双方の目的に対して位相限定相関法に基づく統一的な技術開発を行う。位相限定相関法では、画像の離散フーリエ変換から得られる位相成分だけを利用して、二つの画像から位相限定相関関数(Phase-Only Correlation function, POC 関数)と呼ばれる相関関数を計算する。画像の振幅成分を取り除くことで、画像の明るさの変化など、様々な外乱に対してロバストなマッチングが可能となる。POC 関数は、デルタ関数に近い極めて鋭いピークを持ち、このピークの高さは二つの画像間の類似度に対応し、ピークの座標は画像間の相対的な位置ずれに対応する。このピーク形状は、理論的に導出することが可能であるため、この理論モデルを離散的な値として得られる POC 関数に対してフィッティングすることにより、サブピクセル精度でピークの座標と高さを推定することができる。

実際に生体画像のマッチングを高精度に行うためには、通常の POC 関数をそのまま用いるのではなく、様々な高精度化手法を適用することが重要になる。例として、窓関数による画像端での不連続性の軽減、スペクトル重み付けによる低信頼な周波数成分の抑制、複数の POC 関数の集約による相関ピークの SN 比の向上などがあげられる。

第4章 生体画像の照合への応用

本論文で提案する虹彩認証アルゴリズムでは、まずカメラで撮影した虹彩画像から虹彩領域を特定し、瞳孔径およびカメラと虹彩との距離を正規化するために虹彩領域を極座標変換する(図1上)。そして、得られた正規化画像に対して位相限定相関法を適用することで、虹彩画像の照合を行う。

正規化された虹彩画像の重要な情報は、周波数領域において低域に矩形状に集中している(図1下)。この性質により、通常の POC 関数を用いて照合を行うと、エネルギーが小さくノイズなどの影響を

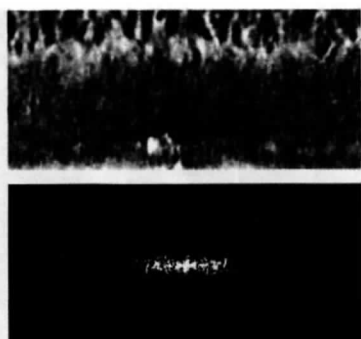


図1 正規化した虹彩画像
(上：空間領域，下：周波数領域)

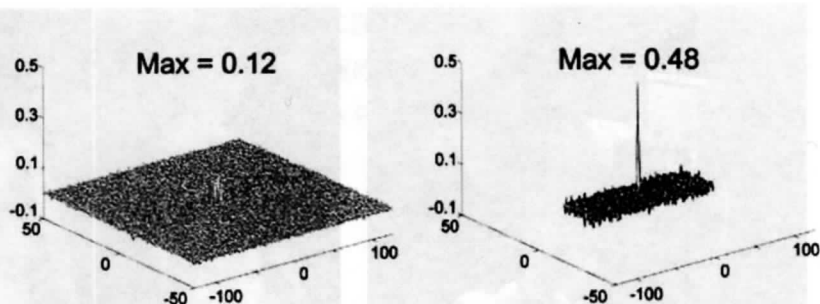


図2 POC関数とBLPOC関数の比較
(左：POC関数，右：BLPOC関数)

表1 実験結果

手法	EER [%]
Boles	8.13
Daugman	0.08
Ma	0.07
Tan	0.57
Wildes	1.76
Proposed	0.0032

受けやすい高周波成分が悪影響を及ぼし，十分な認証性能を得ることができない．そのため，高周波成分の影響を抑制したうえでマッチングを行うことが重要である．そこで，提案手法では，虹彩画像の照合に帯域制限位相限定相関関数（Band-Limited Phase-Only Correlation function, BLPOC 関数）を用いる．BLPOC 関数は，POC 関数の計算の際に，利用する周波数帯域を重要な帯域のみに制限することで得られる．BLPOC 関数を用いることで，信頼性の低い周波数成分の影響を除外し，相関ピークのエネルギーを集中させることが可能である．実際に同一の虹彩から得られた二つの画像に対して，通常の POC 関数と BLPOC 関数を計算した結果を図2に示す．同図より，

BLPOC 関数は POC 関数に比べて大幅に高い相関ピークを示していることがわかる．提案手法では，この BLPOC 関数の相関ピークの高さを照合スコアとして利用し，二つの虹彩画像が同一の虹彩から得られたものなのかどうかを判定する．

本論文では，一般に公開されている大規模な虹彩画像データベースを用いて提案手法の性能評価を行った．利用したデータベースには，756枚の虹彩画像が含まれており，本人同士の認証ペア数は2,268組，他人同士の認証ペア数は283,122組である．提案手法と従来手法の比較を行った結果を表1に示す．ここで，性能指標として用いた EER (Equal Error Rate) とは，誤って他人を受け入れてしまう割合である他人受入率と，誤って本人を拒否してしまう割合である本人拒否率が等しくなるように照合スコアに閾値を設定した場合のエラー率であり，小さいほど性能が高い．表1を見ると，提案手法は従来手法に比べて大幅に小さな EER を示しており，非常に高い認証性能を持つことが分かる．

第5章 生体画像のレジストレーションへの応用

本章では，ステレオビジョンを用いた受動型人体形状計測に着目し，ステレオ画像の対応付けに位相限定相関法を利用することで，従来の能動型計測システムに匹敵する計測精度を持つ受動型人体形状計測システムの開発を行う．

ステレオビジョンを用いた3次元計測において必須となるステレオ画像の対応付けには，画像から切り出した局所的なブロック間でレジストレーションを行うブロックマッチングが一般的に用いられる．このブロックマッチングに位相限定相関法を用いることで，カメラから1m程度の距離にある物体の3次元形状を誤差1mm以下で計測することが可能である．画像の輝度値差分に基づく従来手法に比べ，位相限定相関法の利用により精度とロバスト性の両面で高い性能向上が実現できる．

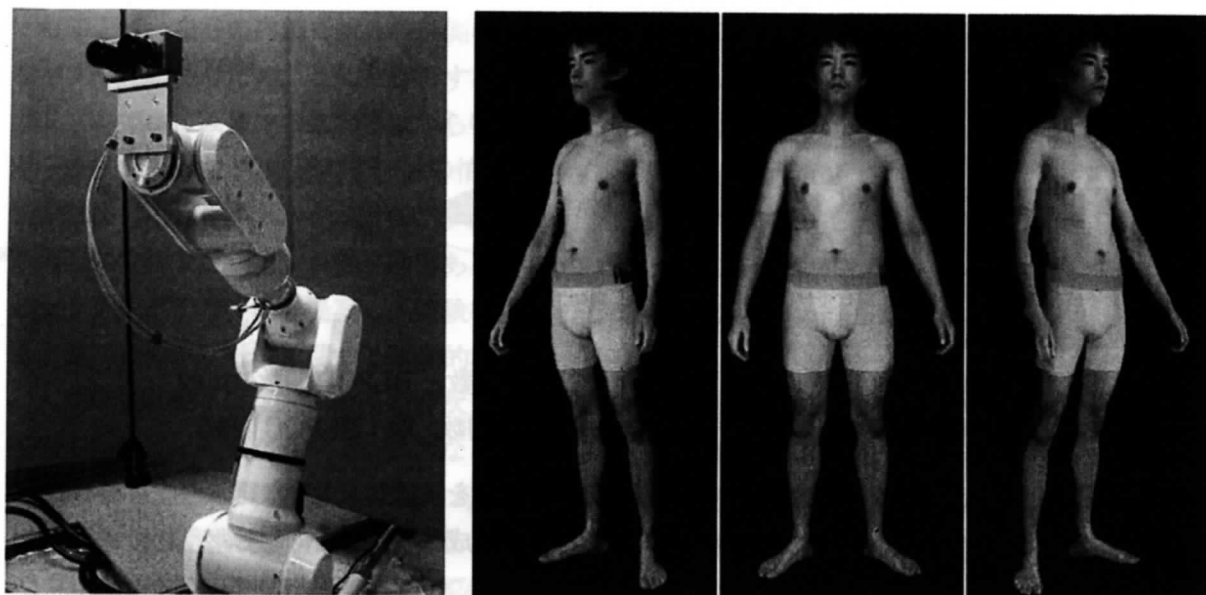


図3 受動型人体形状計測システムと人体全身の計測結果

人体全身を計測するためには、カメラの画角の制限により一つの視点から撮影を行うだけでは不十分である。つまり、複数の視点から人体を部分的にステレオ撮影し、それぞれから得られる3次元データを統合することで全身の形状計測を行う必要がある。本論文では、複数の視点からの撮影を効果的に行うため、ステレオカメラとロボットアームを組み合わせた人体形状計測システムを提案する。提案システムを図3に示す。提案システムでは、ロボットアームの姿勢を変えるだけで撮影視点を変更することができるため、撮影視点の柔軟性に優れる。また、ステレオカメラは一組しか利用しないため、キャリブレーションも容易である。さらに、撮影時のカメラ位置をロボットアームの姿勢から求めることができるため、どのような視点でステレオ画像を取得したとしても、常に同一の世界座標系において3次元復元を行うことができ、複数の3次元データの統合が非常に容易である。実際に提案システムを用いて取得した人体全身の3次元形状を図3に示す。精度評価用物体として70cm×100cmの平板を提案システムを用いて計測した結果、計測誤差は約0.7mmであった。これまでに実用化されている能動型人体計測システムの計測誤差は概ね0.5～5mm程度であり、提案する受動型人体形状計測システムは、従来の能動型システムに匹敵する計測精度を達成していると言える。

さらに本論文では、開発した受動型人体形状計測技術を特に医療分野へと展開し、新たな可能性の開拓および従来技術の問題解決を行った。具体的には、提案する人体計測技術を3次元医用データとカメラ画像の融合および浮腫治療の効果計測に応用し、実際に病院やクリニックとの連携を通してその有効性を実証した。

第6章 結言

本論文では、人体の画像計測として生体画像のマッチングに着目し、画像マッチングの二つの大きな目的である画像照合と画像レジストレーションの双方に対して位相限定相関法に基づく統一的な技術開発を行った。生体画像の照合では虹彩認証に着目し、位相限定相関法を用いた虹彩認証アルゴリズムを提案した。そして、実験を通して提案手法が従来手法に比べて高い認証性能を持つことを示した。また、生体画像のレジストレーションでは人体形状計測に着目し、位相限定相関法をステレオ画像の対応付けに利用することで、従来の能動型計測システムに匹敵する精度を持つ受動型人体形状計

測システムを提案した。さらに、開発した人体計測技術を特に医療分野へと展開し、その有効性を実証した。以上の結果は、生体画像の解析に位相限定相関法が極めて有効であることを明らかにしており、完全に非拘束・非接触な環境下での人体計測など、今後さらなる進展が期待できる。

論文審査結果の要旨

人体の画像計測は、ヒューマンインタフェース、個人認証、コンピュータグラフィックス、医療などの分野において、その重要性が高まっている。人体の画像計測に必要とされる画像処理の中でも、画像マッチングは最も重要な処理の一つである。著者は、位相限定相関法を用いて、人体から取得される生体画像を高精度にマッチングする手法を考案し、これを眼球の虹彩パターンに基づく個人認証、ならびに、ステレオビジョンを用いた人体形状計測に応用し、その有効性を実証した。本論文はこれらの成果をとりまとめたもので、全文6章よりなる。

第1章は緒言である。

第2章では、人体を対象とする広義の画像計測について概説している。生体画像の高精度マッチングの典型的な応用として、虹彩による個人認証技術およびステレオビジョンを用いた人体形状計測技術に着目し、基礎的考察を与えている。

第3章では、位相限定相関法に基づく高精度画像マッチング手法について述べている。特に、生体画像のマッチングを行う際に重要になる各種の高精度化手法を提案している。

第4章では、位相限定相関法に基づく高精度な虹彩認証の手法を提案している。大規模な虹彩画像データベースを用いて認証実験を行った結果、認証誤り率が0.003%程度となり、従来手法に比べて大幅に優れた認証性能を達成している。また、虹彩画像の取得から認証までを約1秒で実行可能な虹彩認証システムを開発している。これらは実用上重要な成果である。

第5章では、位相限定相関法に基づく人体の3次元形状の計測手法を提案している。位相限定相関法を用いたステレオビジョンによって人体表面の形状を高精度に計測するとともに、多視点から取得された表面を統合することにより、人体形状を広範囲に再構成できることを示している。さらに、ステレオカメラとロボットアームを組み合わせた受動型人体形状計測システムを開発し、約1mの距離に存在する対象の形状を0.7mm程度の誤差で高精度に計測できることを明らかにしている。また、本提案手法を3次元医用データとカメラ画像の融合および浮腫治療の効果計測に応用し、その有効性を実証している。

第6章は結言である。

以上要するに本論文は、位相限定相関法に基づく人体の画像計測手法を提案し、その有用性を様々な応用を通して実証したものであり、画像情報工学および情報基礎科学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（情報科学）の学位論文として合格と認める。